

УДК 621.787.4

**В.А. ФЕДОРОВИЧ**, д-р техн. наук,**И.Н. ПЫЖОВ**, д-р техн. наук,**Н.В. РЯЗАНОВА-ХИТРОВСКАЯ**,**В.В. ВОРОПАЙ**, Харьков, Украина

## ДИНАМИЧЕСКОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

Стаття присвячена дослідженню впливу умов процесу алмазного вигладжування на напружено-деформований стан зони обробки. Шляхом поєднання модельних експериментів на основі методу скінченних елементів і планування багатofакторного експерименту встановлено математичну модель і визначені оптимальні значення використовуваних факторів. Як параметр оптимізації використовували максимальні значення еквівалентних напружень.

**Ключові слова:** алмазне вигладжування, метод скінченних елементів

Статья посвящена исследованию влияния условий процесса алмазного выглаживания на напряженно-деформированное состояние зоны обработки. Путем сочетания модельных экспериментов на основе метода конечных элементов и планирования многофакторного эксперимента установлена математическая модель и определены оптимальные значения используемых факторов. В качестве параметра оптимизации использовали максимальные значения эквивалентных напряжений.

**Ключевые слова:** алмазное выглаживание, метод конечных элементов

The article is devoted to the investigation of the influence of the conditions of the diamond smoothing process on the stress-strain state of the treatment zone. By combining model experiments based on the finite element method and planning a multifactor experiment, a mathematical model is established and the optimal values of the factors used are determined. The maximum values of equivalent stresses were used as an optimization parameter.

**Keywords:** diamond smoothing, finite element method

**1. Постановка проблеми.** Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники [1]. Это открывает перспективы разработки трехмерной методологии комплексного исследования процессов обработки деталей машин, в том числе и методом алмазного выглаживания, с целью повышения эффективности процессов обработки и улучшения эксплуатационных свойств производимой продукции. Методология трехмерного компьютерного моделирования позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований при определении оптимальных условий обработки для получения изделий требуемого качества.

Создание методологических основ моделирования процессов обработки методом алмазного выглаживания позволит существенно повысить их эффективность и стабильность, повысить качество продукции, добиться увеличения стойкости инструмента и тем самым улучшить экономические показатели процесса.

**2. Анализ последних достижений и публикаций.** Основными моделируемыми технологическими процессами являются процессы резания: фрезерование, точение, сверление, развертывание, протягивание и др. [2]. Для имитационного моделирования процессов алмазного выглаживания [4] с целью определения температурных и силовых характеристик, эквивалентных и остаточных напряжений в зоне пластической деформации часто используется ведущий специализированный программный комплекс AdvantEdge компании Third Wave Systems основанный на методе конечных элементов. Он позволяет осуществлять 2D и 3D моделирование и симулировать процессы механической обработки в динамике [3]. Программа позволяет рассчитывать температуры и силы, действующие в системе инструмент-заготовка, эквивалентные напряжения, остаточные напряжения и т.д. Помимо стандартного инструмента и заготовок у пользователя есть возможность загружать в программу собственные CAD-модели, траектории и параметры их движения, выбирать их материалы из обширного каталога программы или создавать пользовательские, задавать начальные условия (начальная температура, внутренние напряжения и др.), а также учитывать воздействие СОТС. Это позволяет расширить охват технологических процессов и использовать AdvantEdge для моделирования и симуляции процесса алмазного выглаживания.

**3. Цель исследования.** Определение влияния условий алмазного выглаживания на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «алмазный выглаживатель – обрабатываемый материал».

**4. Материалы исследования.** Для повышения результативности исследований в данной работе сочетались два подхода. Основой исследований являлось непосредственно 3D моделирование НДС рассматриваемой системы. Однако физические модельные эксперименты велись таким образом, чтобы их можно было непосредственно использовать для определения математической модели с помощью планирования многофакторного эксперимента. При исследовании процесса алмазного выглаживания использовали D – оптимальный план типа В4. Параметром оптимизации  $Y$  служили максимальные значения эквивалентных напряжений ( $\sigma_{\text{экв}}$ ) в системе. В качестве факторов были приняты (табл. 1): радиус  $r_n$  рабочей поверхности алмазного выглаживателя (фактор  $X_1$ ), скорость  $V$  выглаживания (фактор  $X_2$ ), глубина  $t$  выглаживания (фактор  $X_3$ ) и модуль упругости  $\mu$  обрабатываемого материала (фактор  $X_4$ ). Диапазоны

натуральных значений факторов были следующими:  $r_b=1-3$  мм;  $V=60-140$  м/мин;  $t=6-10$  мкм;  $\mu=(0,69-2,01)E+11$  Н/м<sup>2</sup>.

В данной работе, чтобы задать модуль упругости обрабатываемого материала для соблюдения максимальной точности эксперимента и максимального соответствия реальному процессу было принято решение не создавать специальные пользовательские материалы, используя встроенные возможности программного пакета Third Wave Advantedge.

Таблица 2 – Значения исследуемых факторов для проведения модельных экспериментов

№ Эксперимента	X1 ( $r_b$ )	X2 (V)	X3 (t)	X4 ( $\mu$ )	$Y(\sigma_{\text{экв}})$ , ГПа
1	1	1	1	1	1,098
2	-1	1	1	1	1,395
3	1	-1	1	1	1,089
4	-1	-1	1	1	1,392
5	1	1	-1	1	1,056
6	-1	1	-1	1	1,329
7	1	-1	-1	1	1,039
8	-1	-1	-1	1	1,396
9	1	1	1	-1	0,422
10	-1	1	1	-1	0,484
11	1	-1	1	-1	0,416
12	-1	-1	1	-1	0,495
13	1	1	-1	-1	0,476
14	-1	1	-1	-1	0,485
15	1	-1	-1	-1	0,488
16	-1	-1	-1	-1	0,485
17	1	0	0	0	0,687
18	-1	0	0	0	0,652
19	0	1	0	0	0,673
20	0	-1	0	0	0,658
21	0	0	1	0	0,692
22	0	0	-1	0	0,691
23	0	0	0	1	1,196
24	0	0	0	-1	0,465

Материалы подбирались исходя из возможности и целесообразности их обработки методом алмазного выглаживания и с соблюдением равности шага их модулей упругости.

Используемые обрабатываемые материалы. *Термообработанный алюминиевый сплав EN AW 2024-T4*. Модуль упругости  $\mu=69$  ГПа. Обладает

высокой прочностью и высокой устойчивостью к усталости, находит отличное применение в деталях и конструкциях, где желательно высокое соотношение прочности к массе. Методом алмазного шлифования его можно обработать до низкой шероховатости и высокой точности. *Никель-алюминиевая бронза C95500 (CuAl11Fe4Ni4)* с модулем упругости  $\mu=135$  ГПа. Данная бронза обладает хорошими механическими свойствами (стойкость к истиранию, прочность, коррозионная стойкость хорошие криогенные свойства, демпфирующая способность в два раза больше, чем у стали, низкая магнитная проницаемость и др.). *Сталь 45*. Относится к классу конструкционных углеродистых качественных сталей и имеет модуль упругости  $\mu=201$  ГПа.

Визуализация результатов модельных экспериментов представлена на рисунках 1 – 3.

В результате реализации выбранного плана В4 было получено следующее уравнение регрессии:

$$Y=0,670 - 0,075X_1 - 0,002X_2+0,002X_3+0,376X_4 - 0,001(X_1)^2 - 0,005(X_2)^2+0,021(X_3)^2+0,160(X_4)^2+0,006X_1X_2 - 0,007X_1X_3 - 0,068X_1X_4+0,004X_2X_3 - 0,001X_2X_4+0,017X_3X_4.$$

Основной задачей имитационного моделирования методом конечных элементов и планирования многофакторного эксперимента было изучение распределения эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали. От этих значений и их распределения зависит результат, полученный при обработке. При превышении предела текучести для обрабатываемого материала упругие деформации в поверхностном слое сменяются пластическими. Происходит дробление зерен металла и сильное искажение кристаллического строения, что приводит к размножению дислокаций, накопление которых вызывает увеличение твердости и прочности, а также уменьшение пластичности. Также деформирование поверхностного слоя вызывает в нем появление сжимающих остаточных напряжений.

В экспериментальной части работы проводилось исследование обработанной поверхности на технической базе Института технологий производства и обеспечения качества Университета им. Отто фон Герики, г. Магдебург. Для исследования ее чистоты и формы микронеровностей использовался оптический микроскоп *Nanofocus μsurf expert*, программный комплекс которого позволяет получать значения шероховатости, строить трехмерные модели поверхности, профили микронеровностей для любой части отсканированной поверхности в любом сечении и др.

Также исследовалось НДС поверхностного слоя после обработки. Применялся рентгенографический метод, основанный на явлении рассеяния мономатериальных рентгеновских лучей при прохождении через регулярную кристаллическую решетку материала. Исследование остаточных

напряжений в поверхностном слое обработанной заготовки проводилось с помощью портативного рентгеновского дифрактометра *Stresstech G2R*.

По результатам проведенного четырехфакторного эксперимента были построены двумерные зависимости максимальных значений эквивалентных напряжений, представленные на рисунках 4 – 6.

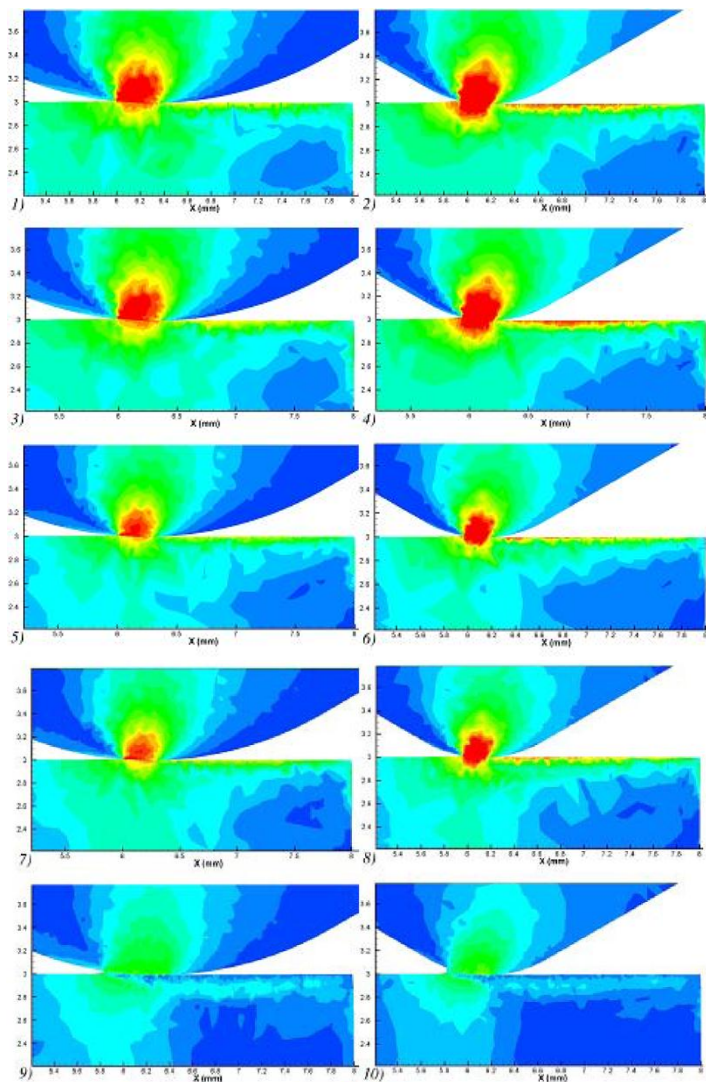


Рисунок 1 – Визуализация модельных экспериментов №№ 1-10

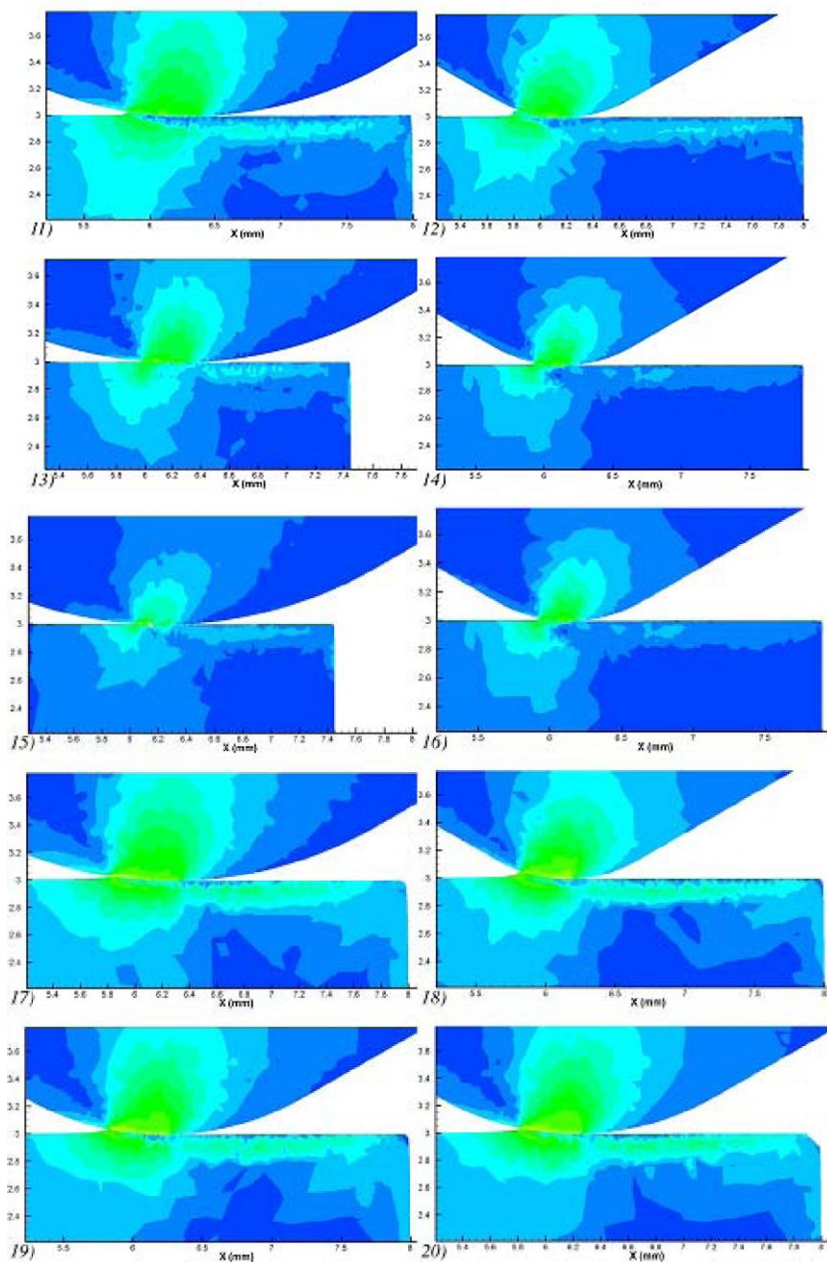


Рисунок 2 – Визуализация модельных экспериментов №№ 11-20

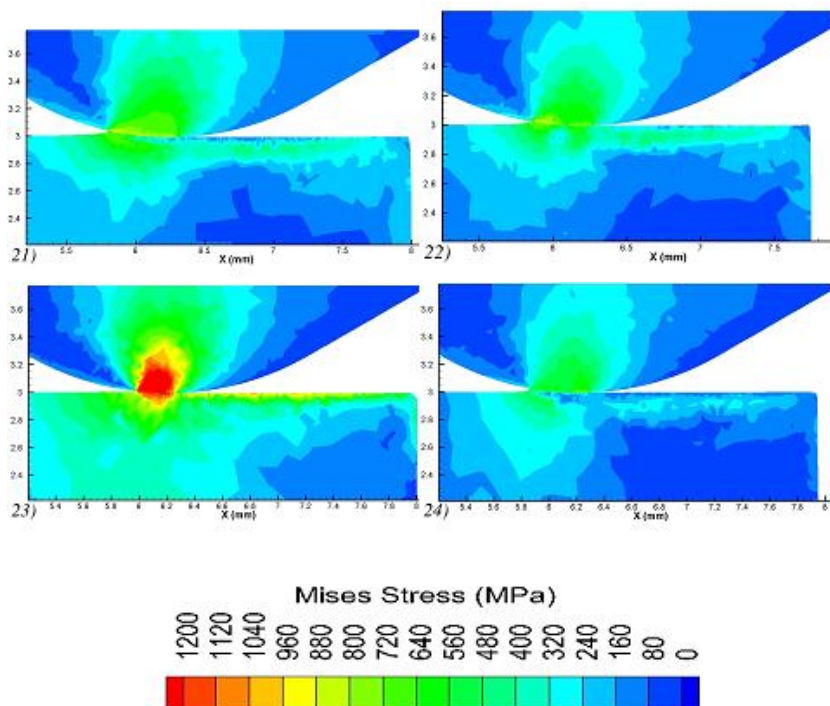


Рисунок 3 – Визуализация модельных экспериментов №№ 21-24

В ходе имитационного моделирования было выявлено значительное отличие в распределении эквивалентных напряжений в зависимости от модуля упругости обрабатываемого материала. Его влияние оказалось наиболее значительным по сравнению с остальными изменяемыми факторами.

При уменьшении модуля упругости обрабатываемого материала происходит значительный спад эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали. Модуль упругости (Юнга) характеризует сопротивление материала растяжению/сжатию при упругой деформации, или его свойство деформироваться вдоль оси воздействия силы. При увеличении модуля упругости материала им оказывается большее сопротивление деформации при обработке методом поверхностного пластического деформирования, что приводит к значительному увеличению эквивалентных напряжений как в поверхностном слое обрабатываемой детали, так и в алмазе инструмента.



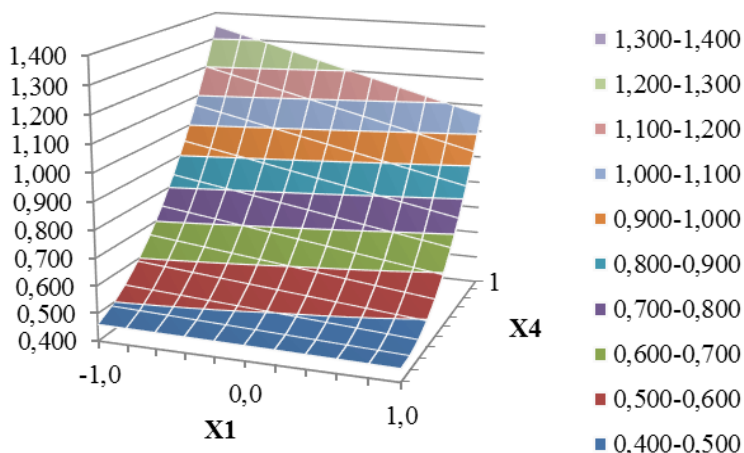


Рисунок 4 – Трехмерная зависимость напряжений от радиуса выглаживателя (X1) и модуля упругости ОМ (X4)

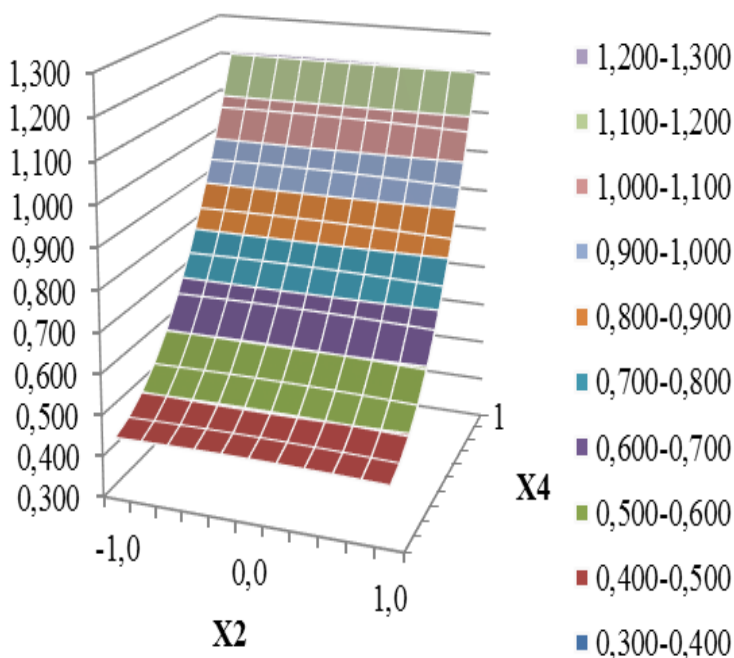


Рисунок 5 – Трехмерная зависимость напряжений от скорости (X2) и модуля упругости ОМ (X4)



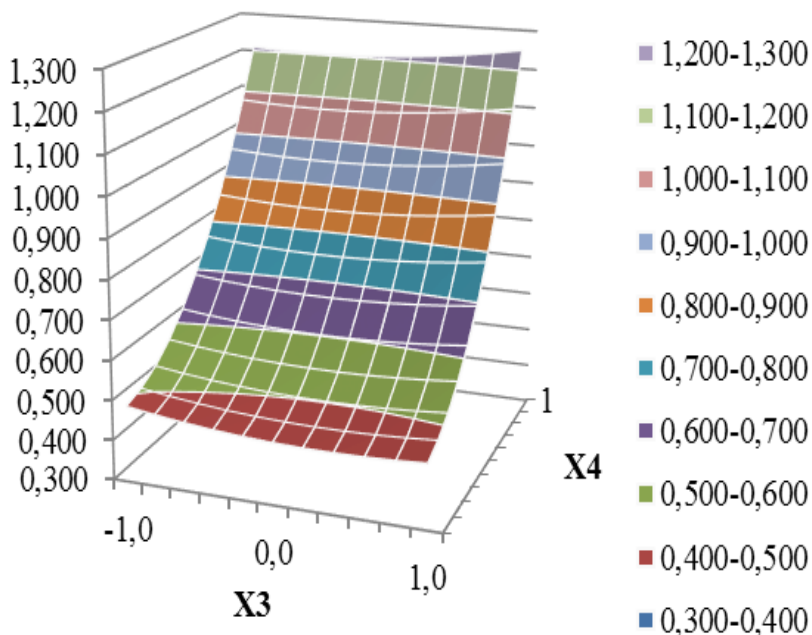


Рисунок 6 – Трехмерная зависимость напряжений от глубины ( $X_3$ ) и модуля упругости ОМ ( $X_4$ )

Увеличение эквивалентных напряжений в поверхностном слое приводит к усилению его напряженно-деформированного состояния, от которого напрямую зависит упрочнение поверхности детали. Следовательно, можно сделать вывод о том, что материалы, имеющие больший модуль упругости, имеют лучшие показатели упрочнения поверхностного слоя при обработке методом алмазного выравнивания.

Как показал эксперимент, увеличение модуля упругости обрабатываемого материала приводит также к увеличению сил действующих на инструмент со стороны обрабатываемой детали. Проекция данной силы на координатные оси и их изменение с момента касания инструмента и заготовки для трех вариантов модуля упругости показаны на рис. 7.

Из графиков изменения проекций силы выравнивания видно, что составляющая силы в направлении противоположном направлению скорости для всех трех вариантов неизменно находится в районе 50-60 Н.

Наличие уравнения регрессии применительно к моделированию динамического процесса алмазного выравнивания позволило выявить возможные экстремумы в компьютерном пакете Maple 14.

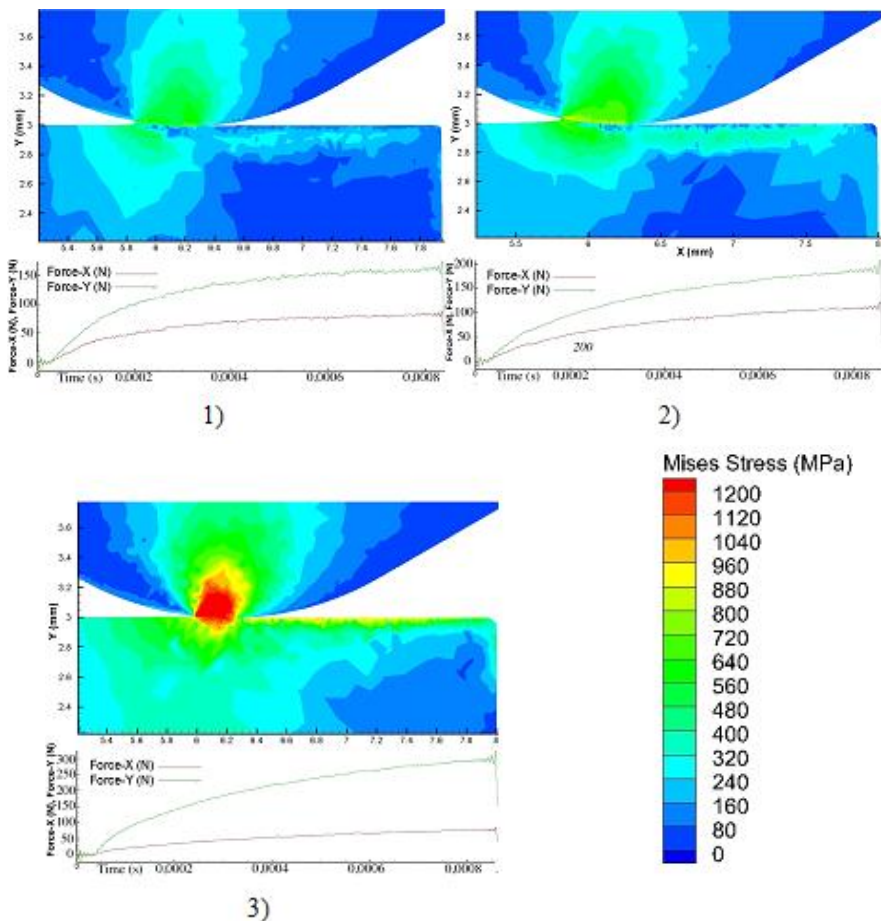
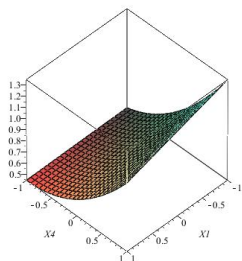


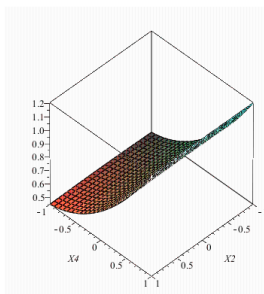
Рисунок 7 – Изменение проекций сил выглаживания и распределение эквивалентных напряжений для материалов: 1 – AW 2024-T4; 2 – C95500 (CuAl11Fe4Ni4); 3 – сталь 45 ( $V=100$  м/мин,  $t=8$  мкм и  $r=2$  мм)

Визуализация оптимального значения напряжений в программном пакете Maple 14 приведена на рис. 8.

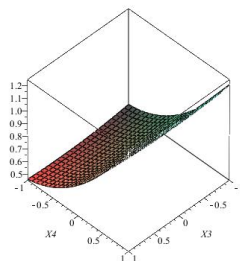
Оптимизация динамического процесса алмазного выглаживания проведена в программном пакете Maple 14. В результате оптимизации установлены оптимальные значения факторов  $X_{1opt}=+1$ ;  $X_{2opt}=-1$ ;  $X_{3opt}=0,6184$ ;  $X_{4opt}=+1$ . При таких значениях основных факторов оптимальными будут максимальные напряжения 1,396 ГПа.



1.



2.



в)

Рисунок 8 – Трехмерная визуализация влияния модуля упругости обрабатываемого материала совместно с радиусом инструмента (а), скоростью (б) и глубиной обработки (в)

**Общие выводы.** Исходя из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на эквивалентные напряжения в зоне обработки оказывает модуль упругости обрабатываемого материала. С его увеличением растут и эквивалентные напряжения. Совместное использование модельных экспериментов по методу конечных элементов и теории планирования многофакторного эксперимента позволяет наиболее эффективно решить задачу оптимизации процесса алмазного выглаживания.

**Список использованной литературы.** 1. Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588. 2. Криворучко Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого. Под общей редакцией В. А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450с. 3. Торбило В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило – М.: Машиностроение, 1972.-104с. 4. Грабченко А. И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учеб. пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588. 2. Krivoruchko D. V. Modelirovanie processov rezaniya metodom konechnyh jelementov: metodologicheskie osnovy: monografija / D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga. Pod obshhej redakciej V. A. Zalogi – Sumy: Universitetskaja kniga, 2012. – 450s. 3. Torbilo V.M. Almaznoe vyglazhivanie / V.M. Torbilo – M.: Mashinostroenie, 1972.-104s. 4. Grabchenko A. I. 3D modelirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovaniya: Ucheb. posobie / A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich. – Har'kov: NTU «HPI», 2006. – 364 s.